

# MEDIDA DE TENSIONES RESIDUALES PARA EL CONTROL Y MEJORA DE LA DURABILIDAD DE LOS ALAMBRES DE PRETENSADO

José Miguel ATIENZA RIERA

Dr. Ingeniero de Caminos

Universidad Politécnica de Madrid

Prof. Contratado Doctor

[jmatienza@mater.upm.es](mailto:jmatienza@mater.upm.es)

Jesús RUIZ HERVÍAS

Dr. Ciencias Físicas

Universidad Politécnica de Madrid

Profesor Titular

[jr@mater.upm.es](mailto:jr@mater.upm.es)

Manuel ELICES CALAFAT

Dr. Ingeniero de Caminos

Universidad Politécnica de Madrid

Catedrático

[melices@mater.upm.es](mailto:melices@mater.upm.es)

## Resumen

En la última década, la Comisión 9 de la *fib*, encargada de todo lo relativo a los materiales y sistemas de pretensado, ha dedicado una gran atención a la mejora de la durabilidad de las estructuras pretensadas. Uno de los aspectos que ha considerado de especial interés es el control del estado de tensiones residuales que presentan las armaduras activas, ya que influye significativamente en sus propiedades mecánicas y en su susceptibilidad a la corrosión bajo tensión. Hasta ahora, el problema de las tensiones residuales había pertenecido al ámbito científico, quedando alejado de la práctica ingenieril, pero todo parece indicar que en los próximos años las diferentes normas internacionales recogerán, entre sus requerimientos para el material, la certificación del nivel de tensiones residuales en su superficie. El Depto de Ciencia de Materiales de la UPM, liderado por Manuel Elices ha dedicado un considerable esfuerzo a entender, medir y controlar las tensiones residuales en las armaduras activas. Este artículo resume la experiencia de los autores, con la esperanza de acercar el problema de las tensiones residuales, su importancia y sus dificultades, al ámbito ingenieril.

**Palabras Clave:** pretensado, armaduras activas, tendones de pretensado, acero estructural, durabilidad, tensiones residuales, corrosión bajo tensión, relajación.

## 1. Introducción

El hormigón pretensado se descubrió en el siglo pasado y hoy ya tenemos experiencia de estructuras pretensadas (fundamentalmente puentes, algunos de los más bellos) construidas hace más de medio siglo. En general, su durabilidad ha sido buena, pero a lo largo de los años han aparecido algunos casos de deterioro, especialmente en la proximidad de ambientes marinos, relacionados con los fenómenos de la corrosión y la corrosión bajo tensión de las armaduras activas.

En un artículo reciente [1], H.R. Ganz, Presidente de la *fib* y Chairman saliente de la Comisión 9 (encargada de todos los aspectos relativos a los materiales y sistemas de pretensado) ha resumido las principales actividades de dicha Comisión durante la última década. Su resumen pone de manifiesto que la mejora de la durabilidad de los tendones de pretensado ha sido una de las principales preocupaciones de la *fib* en los últimos años, como además corrobora la celebración de dos workshops monográficos en Ghent [2] y Zurich [3]. En este sentido, los trabajos presentados por Manuel Elices [4], miembro del Task Group 9.5, han mostrado que el control de las tensiones residuales es uno de los aspectos más prometedores para la mejora de la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión de los alambres de acero, y así lo recoge Ganz en su artículo [1].

Las tensiones residuales, generadas en su proceso de fabricación, influyen de forma significativa en el comportamiento mecánico de los alambres de pretensado [4,5], pudiendo llegar a favorecer, por ejemplo, su corrosión bajo tensión [6,7]. Los fabricantes conocen estos efectos dañinos y tratan de paliarlos mediante tratamientos de alivio de tensiones. El inconveniente es que, hasta ahora, resultaba muy complicado obtener información sobre el estado real de tensiones residuales en los alambres. La medida de tensiones residuales era considerada más bien un problema científico, alejado de la práctica ingenieril pero, gracias a los avances producidos en las técnicas experimentales, hoy se empieza a aceptar a nivel internacional como una herramienta básica para el control y la mejora de la calidad de los materiales. Todo parece indicar que en los próximos años las diferentes normas internacionales recogerán, entre los requerimientos para los alambres de pretensado, la medida del nivel de tensiones residuales en su superficie por difracción de rayos X.

En este artículo se resume el trabajo desarrollado por los autores durante estos últimos años para medir, entender y modificar las tensiones residuales, con el objetivo de mejorar el comportamiento de las armaduras activas del hormigón pretensado. En primer lugar se analiza la influencia que tienen las tensiones residuales en los tres ensayos mecánicos requeridos por las normas (ensayos de tracción, de relajación y de corrosión bajo tensión) y a continuación se examinan las técnicas actuales de caracterización de dichas tensiones, sus inconvenientes y limitaciones, así como la interpretación de sus resultados. Nuestra intención ha sido intentar acercar el problema de las tensiones residuales, su importancia y sus dificultades, al ámbito ingenieril, en un momento en que comienza a considerarse una herramienta básica para el control de los materiales.

## 2. El perfil de tensiones residuales en los alambres de pretensado

El material que constituye las armaduras activas del hormigón pretensado es el alambre de acero eutectoide, con una microestructura perlítica formada por finas láminas de ferrita y cementita [5]. Estos alambres se obtienen mediante una técnica de conformado llamada trefilado, que consiste esencialmente en reducir las dimensiones de una barra por estirado en frío al hacerla pasar a través de unas matrices cónicas (hileras). El alambre final se puede definir como un material nanolaminado que alcanza una elevada resistencia mecánica, a la vez que mantiene una ductilidad y tenacidad aceptables.

En el procesado, los alambres sufren una gran deformación plástica que no es completamente homogénea en toda la sección, lo que origina la aparición de un perfil de tensiones residuales en el producto final. Las tensiones residuales se pueden definir como el estado de tensiones internas autoequilibradas que existe en cuerpos libres de fuerzas exteriores o restricciones actuando en su contorno [8]. Atendiendo a las tensiones residuales en su superficie (parámetro fundamental, ya que es el que se puede medir con los difractómetros de rayos X [8,9] y, como veremos, tiene una influencia decisiva en el comportamiento a corrosión), los alambres se pueden dividir en tres grandes grupos:

a) Alambres con tensiones de tracción en la superficie: Trefilados (*As Drawn*)

El proceso de fabricación por trefilado [5] de las armaduras activas genera en el alambre una gran deformación plástica que no es completamente homogénea en toda la sección, lo que origina la aparición de un perfil de tensiones residuales en el producto final, con compresiones en el centro y tracciones en la superficie (Figura 1).

b) Alambres sin tensiones residuales: Estabilizados (*Stabilized*)

El procedimiento industrial para eliminar las tensiones residuales consiste en someter al alambre trefilado a un tratamiento termomecánico de alivio de tensiones, propio de la industria del pretensado y conocido con el nombre de estabilizado. El estabilizado consiste en dar un tratamiento térmico al alambre durante un tiempo muy corto (del orden de segundos) manteniendo aplicada, simultáneamente, una carga de tracción importante [5]. No obstante, los parámetros concretos del tratamiento siguen dependiendo de cada empresa. El estabilizado es un tratamiento muy eficaz para eliminar las tensiones residuales (Figura 1) y mejora de forma importante el comportamiento de los alambres en relajación. Hoy en día, ha sustituido al resto de tratamientos térmicos de alivio de tensiones y los alambres "Estabilizados", también llamados "de baja relajación", son prácticamente los únicos utilizados para las armaduras activas del hormigón pretensado.

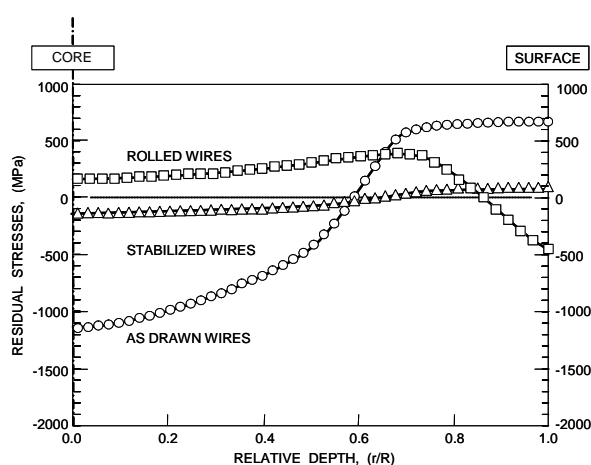


Fig. 1. Perfiles de tensiones residuales en un radio de un alambre de pretensado inmediatamente después del procesado (*As drawn*), tras un tratamiento de eliminación de tensiones (*Stabilized*) y después de un tratamiento superficial (*Rolled*)

c) Alambres con tensiones de compresión en la superficie: Laminados (*Rolled, Laminated*)

Para obtener compresiones en la superficie se utilizan tratamientos mecánicos superficiales (laminados, paso a través de matrices especiales,...) con efectos similares a los producidos por el tratamiento de "shot peening" en la industria aeronáutica; algo parecido a un masaje que genera una pequeña plastificación superficial y cambia completamente el perfil de tensiones residuales [5], generando tracciones en el centro del alambre e importantes compresiones en su superficie (Figura 1).

### 3. Importancia de las tensiones residuales

Para entender la importancia de las tensiones residuales, en este apartado se analiza la influencia que tienen en los tres ensayos mecánicos requeridos por las normas para las armaduras activas: ensayos de tracción, de relajación y de corrosión bajo tensión.

#### 3.1 Influencia de las tensiones residuales en el ensayo de tracción

Los autores han mostrado que la presencia de tensiones residuales puede modificar significativamente la curva tensión-deformación de un alambre de pretensado [5,10]. En un ensayo de tracción sobre un material sin tensiones residuales (Figura 2.a), la probeta se va cargando de forma elástica y uniforme hasta alcanzar, en toda la sección a la vez, su límite de elasticidad, momento a partir del cual comenzará a plastificar y se perderá la proporcionalidad de la ley tensión-deformación.

La existencia de un perfil de tensiones residuales longitudinales con tracciones en la superficie y compresiones en el centro del alambre, provoca que, en el ensayo de tracción, el material comience a plastificar en la zona superficial a cargas inferiores a las que cabría esperar para el material sin tensiones residuales (Figura 2.b). A partir de ese momento, al seguir aumentando la carga ésta ya no se distribuye uniformemente, sino que la mayor parte se la lleva la zona central del alambre mientras que en la zona plastificada apenas aumenta la tensión. Esta plastificación parcial en la zona superficial hace disminuir el límite de proporcionalidad y el límite elástico convencional del alambre, sin afectar de forma importante a la tensión de rotura. Conviene llamar la atención sobre el hecho de que la plastificación en la superficie puede suceder aunque el nivel de tracciones siga siendo muy bajo en el centro del alambre, el cual incluso podría estar sometido todavía a compresiones.

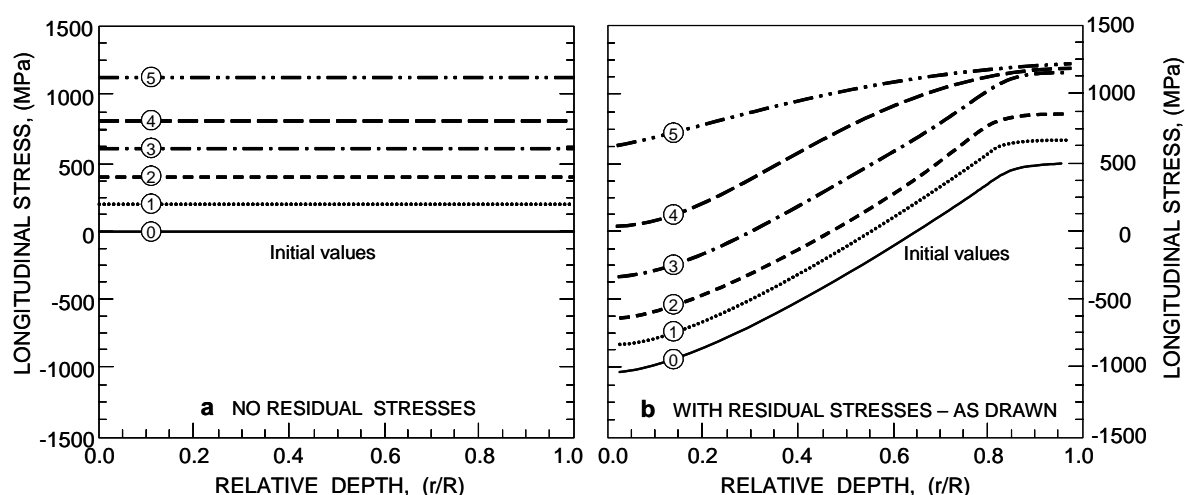


Fig. 2. Evolución del perfil de tensiones en el radio de un alambre de 1100 MPa de límite elástico durante un ensayo de tracción: a) Alambre sin tensiones residuales. b) Alambre con tensiones residuales debidas al trefilado. Las tensiones representadas en las figuras se corresponden con los mismos pasos de carga [10].

En el caso del alambre Laminado, el efecto es similar al del alambre Trefilado, sólo que esta vez la plastificación se producirá primero en el centro del alambre, que parte con tensiones residuales de tracción.

Todo esto se ve claramente reflejado si comparamos las curvas tensión-deformación de un alambre Trefilado sin ningún tratamiento posterior (nivel alto de tensiones residuales), un alambre Laminado (compresiones en la superficie) y un alambre Estabilizado, al que se le han eliminado la mayor parte de las tensiones residuales (Figura 3). El alambre con tensiones residuales pierde la linealidad antes. En realidad, en un material con muchas tensiones residuales es difícil hablar de un límite elástico ya que éste se alcanza en cada zona de su sección en momentos diferentes. Se aprecia que la disminución de las tensiones residuales provoca un aumento del límite de proporcionalidad y el límite elástico mientras que la tensión de rotura se mantiene en los mismos niveles.

Las distintas normas internacionales (ASTM-A421-91, BS-2691, Model Code CEB-FIP, EHE-UNE 36094) establecen que los alambres de acero para pretensar deben cumplir que la relación  $\sigma_{0,2\%}/\sigma_{\max}$  entre su límite elástico al 0,2% y su tensión máxima debe estar entre 0,85-0,95. Los resultados obtenidos en este trabajo justifican la exigencia de un límite inferior para dicha relación por la necesidad de controlar el estado de tensiones residuales generado en el alambre.

En resumen, desde el punto de vista del ensayo de tracción, el mejor alambre será aquél que tenga menores tensiones residuales. La existencia de un perfil de tensiones residuales, bien sea con tracciones o con compresiones en la superficie provocará que el alambre comience a plastificar antes en algunas zonas, con la consiguiente pérdida de linealidad de la curva tensión-deformación [10].

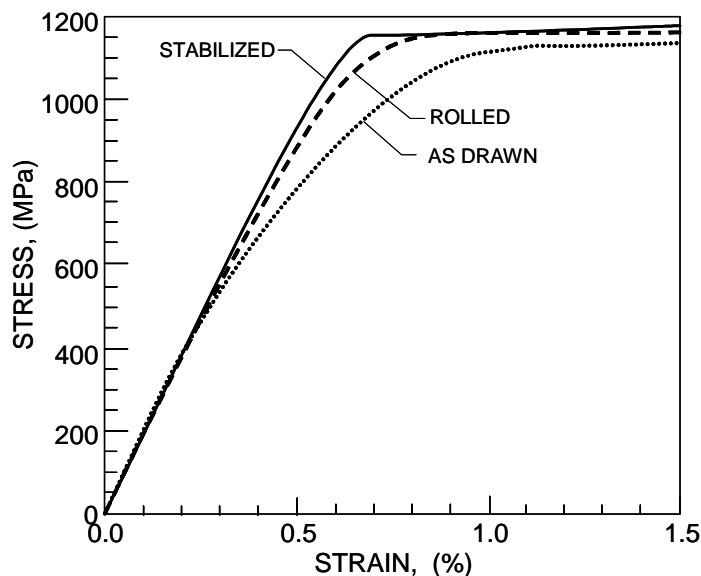


Fig. 3. Influencia de las tensiones residuales en la curva tensión-deformación. Comparación de un ensayo de tracción de un alambre de 1100 MPa de límite elástico sin tensiones residuales (Stabilized) con alambres con tensiones residuales en la superficie de tracción (As drawn) y de compresión (Rolled). Se aprecia que la presencia de tensiones residuales provoca que el alambre comience a plastificar antes y pierda la linealidad de la curva tensión-deformación

### 3.2 Influencia de las tensiones residuales en el ensayo de relajación

Las pérdidas por relajación se miden mediante unos ensayos estandarizados (ISO 15630-3, ASTM E328-86, EHE 38.9), cuyos resultados deben ser aportados por el fabricante para la aceptación de las armaduras. Los alambres que tienen unas pérdidas inferiores al 2.5% de la tensión inicial (después de 1000 horas, cuando se someten a una carga inicial del 70% de su resistencia a tracción) se llaman alambres de baja relajación y son los recomendados en la actualidad.

Los autores han mostrado que alambres con la misma composición, microestructura y similares propiedades mecánicas, pueden tener comportamientos muy diferentes en el ensayo de relajación si sus perfiles de tensiones residuales son distintos [11,12]. Para entenderlo hay que tener en cuenta la influencia de la carga inicial sobre la relajación. En la Figura 4.a se muestran las pérdidas por relajación en un alambre sin tensiones residuales (Estabilizado) al cabo de 250 horas, en función de la carga inicial con la que se haya solicitado al alambre. Como se puede apreciar las pérdidas son pequeñas en un rango importante de cargas iniciales, hasta que nos acercamos al límite elástico del material (85-90% de la carga de rotura), donde aumentan de forma muy importante.

Si representamos la misma Figura 4.b para alambres con tensiones residuales (Trefilado y Laminado) se puede comprobar que el comportamiento es bastante diferente. Ya no existe un quiebro significativo en torno al límite elástico del material y las pérdidas son mucho mayores que en el alambre sin tensiones residuales cuando la carga inicial es inferior al límite elástico (85% de la carga de rotura), mientras que se hacen similares a altas cargas iniciales (superiores al 90% de la carga de rotura).

La explicación se encuentra en la distribución de tensiones reales que hay en la sección transversal del alambre al principio del ensayo de relajación. En el caso del alambre sin tensiones residuales, la carga se distribuye uniformemente en toda la sección, por lo que estará relajando igual en todos los puntos al estar cargados a la misma tensión inicial. Sin embargo, en el alambre con tensiones residuales iniciales, al cargarlo la distribución de tensiones en la sección no va a ser uniforme. El resultado es que la relajación del alambre será la suma de las relajaciones que tenga en sus distintas zonas, que no van a estar cargadas a la misma tensión inicial. En concreto, en un ensayo normalizado (tensión inicial 70% de la carga de rotura), la zona central del alambre, al partir con tensiones residuales de compresión, relajará como si la tensión inicial del ensayo fuera muy inferior al 70% (ver Figura 4.a) y la zona superficial, que partía con tensiones residuales de tracción, lo hará como si la carga inicial estuviera cercana al límite elástico (ver Figura 4.a). En este caso,

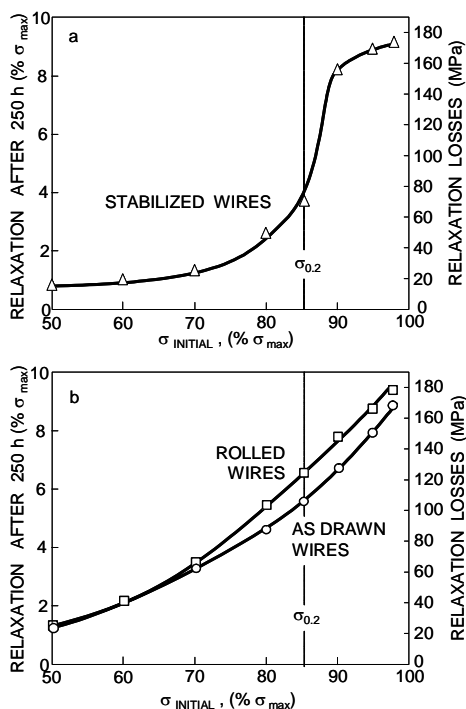


Fig. 4. Pérdidas de tensión por relajación al cabo de 250 horas para los tres tipos de alambres estudiados en función de la carga inicial utilizada en el ensayo. Se observa que en el caso del alambre sin tensiones residuales (Stabilized) la relajación aumenta mucho cuando se utiliza una carga próxima al límite elástico. Ese quiebro no se observa para los otros dos tipos [12].

la superficie tendrá unas pérdidas por relajación muy importantes. La suma de todas esas relajaciones nos da la relajación total del alambre. Esto explica que ya no exista un quiebro importante a cargas próximas al límite elástico, porque la tensión de plastificación ya no se alcanza a la vez en toda la sección. Lo mismo se puede decir para el alambre Laminado, sólo que en este caso será la zona central del alambre, que partía con tensiones residuales de tracción, la que sufra mayores pérdidas por relajación.

En resumen: Dos alambres con similares propiedades mecánicas (resistencia y ductilidad) pero con diferentes niveles de tensiones residuales exhibirán comportamientos distintos en el ensayo de relajación. Desde el punto de vista de la relajación de tensiones, el mejor alambre será el Estabilizado. La existencia de un perfil de tensiones residuales, bien sea con tracciones o con compresiones en la superficie, provocará que aumenten sus pérdidas por relajación (Figura 5) [12].

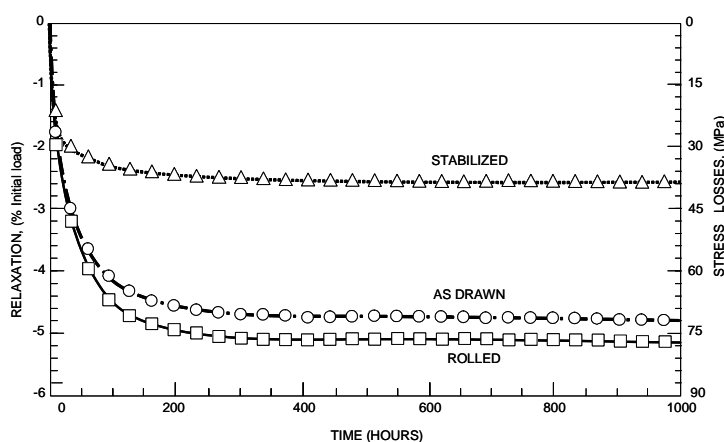


Fig. 5. Curvas de relajación para los tres tipos de alambres estudiados obtenidas en el ensayo de relajación normalizado: carga inicial 70% de la resistencia [12].

### 3.3 Influencia de las tensiones residuales en el ensayo de corrosión bajo tensión

El fenómeno de la corrosión bajo tensión consiste en que bajo la acción combinada de la tensión y el ambiente agresivo se generan fisuras en los alambres que pueden crecer con tensiones del orden de la tensión de trabajo y provocar la rotura de las armaduras. Se trata de una cuestión de gran importancia, tanto desde el punto de vista de la seguridad estructural, porque implica una pérdida de capacidad resistente en el material con el consiguiente riesgo de rotura catastrófica, como desde el punto de vista económico, por la necesidad del mantenimiento de los elementos dañados, lo que encarece los costes de conservación.

El ensayo en tiocianato amónico propuesto por la FIP en 1978 continúa siendo el utilizado en la actualidad para el control y la aceptación de estos aceros [4,13]. Se trata de un ensayo de fragilización por hidrógeno en el que se determina el tiempo hasta rotura de un alambre de acero cargado con una fuerza de tracción constante de 0.8 Fm (donde Fm es la carga máxima de tracción que aguanta el alambre), inmerso en una solución de  $\text{NH}_4\text{SCN}$  (200 g de  $\text{NH}_4\text{SCN}$  en 800 ml de agua destilada) a una temperatura de  $50 \pm 1^\circ\text{C}$ . Se ha mostrado que el daño superficial que puede provocar variaciones en los tiempos de fractura por fragilización por hidrógeno debería tener una profundidad del orden de 0.1 mm o menos [4]. Las tensiones residuales existentes en esa zona tendrán una influencia fundamental al sumarse a la carga que reciba el alambre.

Los resultados medios de los ensayos FIP normalizados para los tres tipos de alambres estudiados en este trabajo se recogen en la Tabla 1. El alambre Estabilizado muestra una mejora de comportamiento frente al alambre simplemente Trefilado. Pero sin duda, el mejor comportamiento desde el punto de vista de la corrosión bajo tensión es el del alambre Laminado. Las diferencias de comportamiento entre los tres tipos de alambres todavía se hacen más evidentes cuando reducimos la carga aplicada en el ensayo FIP, tal y como se aprecia en la Figura 6.

Tabla 1. Tiempo hasta rotura en los ensayos FIP78 normalizados para los tres tipos de alambres estudiados en este trabajo

	Trefilado	Estabilizado	Laminado
Tiempo hasta Rotura (h)	2	4	12

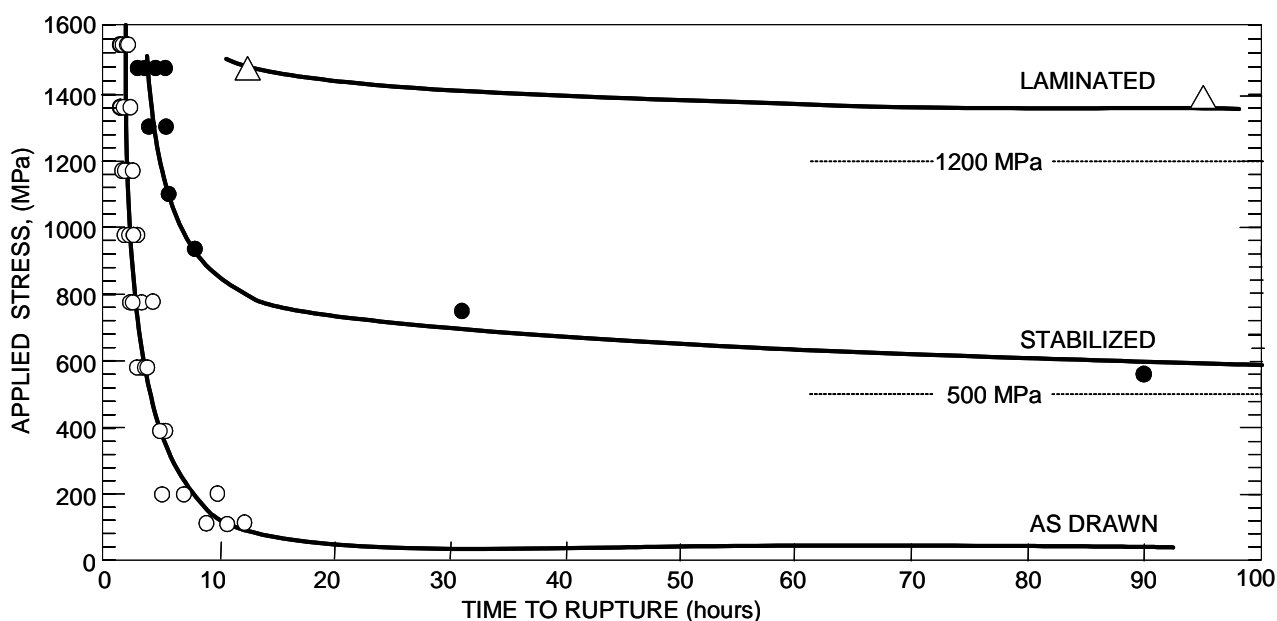


Fig. 6. Tiempos hasta rotura en el ensayo de fragilización por hidrógeno FIP78 con tiocianato amónico para los tres tipos de alambres, en función de la carga aplicada en el ensayo. Se observa que los tres alambres (con la misma composición, microestructura y similares propiedades mecánicas) presentan un comportamiento muy diferente en corrosión bajo tensión debido, fundamentalmente, a sus tensiones residuales en la superficie [6].

Se ha detectado una buena correlación entre las tensiones residuales en la superficie de los alambres y los tiempos de rotura medidos en los ensayos FIP. Las diferencias en los tiempos de rotura en alambres de pretensado —con la misma microestructura, calidad superficial y propiedades mecánicas— parecen deberse a las diferencias en los perfiles de tensiones residuales. Los alambres inmediatamente después del proceso de trefilado tienen altas tensiones residuales de tracción en la superficie, por lo que presentan tiempos de rotura menores que los alambres del mismo tipo que han sufrido algún tratamiento posterior de eliminación de tensiones. El mejor tratamiento es el que genera tensiones de compresión en la superficie, provocando una mejora significativa de la durabilidad del material en condiciones agresivas (Figura 6). Esto es debido a que la zona superficial es la que determina el inicio de la fisuración y define el comportamiento final del alambre a corrosión bajo tensión. Por tanto, el mejor comportamiento se obtiene generando compresiones importantes en esa zona, que reduzcan la tensión final a que va a estar sometida la armadura [6,7]. En vista de los problemas de durabilidad que presentan los tendones activos de las estructuras pretensadas construidas en la proximidad de ambientes agresivos, consideramos que podría ser interesante utilizar un tratamiento de este tipo cuando las armaduras se fueran a emplear en esas condiciones.

#### 4. Caracterización de las tensiones residuales

##### 4.1 Principales técnicas de medida experimental

En la actualidad hay disponibles un considerable número de técnicas experimentales para la medida de las tensiones residuales, que fundamentalmente se pueden clasificar en dos grupos [9]:

- Métodos mecánicos: Miden la deformación elástica recuperada al producirse una relajación de las tensiones por la eliminación de parte del material. En la práctica únicamente se miden tensiones cercanas a la superficie. En general este tipo de técnicas sirven como evaluación cualitativa y control en la industria.

- Métodos de difracción: La medida de tensiones residuales por difracción en materiales cristalinos está basada en la Ley de Bragg [8], que relaciona  $d_{hkl}$  la distancia interplanar correspondiente a una familia de planos cristalinos (hkl) con el ángulo de difracción  $\theta_{hkl}$  producido por la reflexión para un valor dado de la longitud de onda incidente  $\lambda$  :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \quad (1)$$

Las deformaciones y tensiones residuales se calculan entonces relacionando la distancia interplanar  $d_{hkl}$  medida con el valor de referencia sin tensiones  $d^0$  y conociendo las constantes elásticas del material [5].

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0} \quad (2)$$

Las medidas por difracción se pueden realizar en tres tipos de instalaciones:

- Difractómetros de Rayos X convencionales: existentes ya en muchos laboratorios de investigación, tienen el inconveniente de que sólo permiten obtener información de la zona superficial del material.
- Difractómetros de Neutrones: Cuentan con la ventaja de que son capaces de penetrar en el material, con lo que permiten medir tensiones residuales en profundidad, dando información de lo que sucede en un diámetro completo de los alambres.
- Sincrotrón: son Rayos X de alta intensidad (en torno a 1 millón de veces más intensos que los convencionales). La información obtenida es comparable con la de los neutrones, bajo ciertas condiciones.

Los métodos de difracción se han convertido en los más importantes y prometedores para la medida de tensiones residuales en materiales cristalinos. Entre sus ventajas destacan que tienen una alta resolución y precisión, son no destructivos y permiten conocer las tensiones residuales en cada fase de un material polifásico. Además, en muchos difractómetros ya se dispone de máquinas de tracción acopladas que permiten la medida de tensión simultánea a una carga aplicada a la muestra.

## 4.2 Problemas de la medida de tensiones residuales por difracción en las armaduras activas

La microestructura de los alambres de pretensado, formada por finas láminas de ferrita y cementita, complica significativamente la medida de tensiones residuales por técnicas de difracción, debido fundamentalmente a dos razones:

1.- Tensiones residuales en la cementita: El principal problema para obtener las tensiones residuales en los alambres de pretensado es la dificultad para medir por difracción las tensiones en la fase cementita. Con los métodos de difracción se miden las tensiones residuales en cada una de las fases de un material polifásico. En el caso de las armaduras, habría que medir por separado las tensiones en la fase ferrita y en la cementita. Para obtener las tensiones reales en el material perlítico (macro tensiones  $\sigma^{\text{Macro}}$ ) se utiliza la regla de las mezclas con las fracciones volumétricas de cada fase [8]:

$$\sigma^{\text{Macro}} = (1-f) \sigma^{\text{fe}} + f \sigma^{\text{c}} \quad (3)$$

Siendo  $\sigma^{\text{fe}}$  y  $\sigma^{\text{c}}$  las tensiones residuales medidas para la ferrita y la cementita y  $f$  la fracción volumétrica de cementita, que suele estar en torno al 10%. El problema es que la pequeña fracción de volumen que ocupa la cementita así como su estructura ortorrómbica hacen muy complicado obtener información sobre sus picos de difracción (difícilmente distinguibles del ruido de fondo), por lo que hoy en día resulta muy complicado medir las tensiones de la cementita en alambres comerciales.

2.- La  $d^0$  en la ferrita: No es difícil medir el espaciado laminar en la fase ferrita (normalmente se emplean los planos cristalinos (110) y (211) que tienen picos de difracción de gran intensidad). El problema es que para obtener las tensiones en la ferrita es necesario utilizar un valor de comparación  $d^0$ , espaciado de referencia que representa el espaciado interplanar de la ferrita sin tensiones residuales. La determinación de este parámetro no es un problema trivial, porque para calcular valores de deformaciones y tensiones con errores aceptables, el error en  $d^0$  debe ser menor que el 0,01% de su valor real [8,14]. Los métodos tradicionales para obtener este valor están basados en la relajación de las tensiones residuales bien sea utilizando polvos de hierro, cortando pequeños cupones del material real o utilizando tratamientos térmicos de recocido.

A pesar de estas dificultades, un número importante de estudios habían arrojado resultados interesantes sobre las tensiones residuales en esta clase de alambres [15,16,17]. Se habían medido tensiones residuales en la fase ferrita y se habían realizado esfuerzos importantes, utilizando la difracción de rayos X, de neutrones y la radiación sincrotrón para medir en fase cementita. No obstante, hace diez años, al inicio de esta investigación, una medida experimental de un perfil de tensiones residuales a lo largo de un diámetro de un alambre de pretensado no se había obtenido nunca.

### 4.3 Calibración de las técnicas experimentales

Dadas las dificultades expuestas, antes de emprender la caracterización de las tensiones residuales en alambres de pretensado comerciales, consideramos la necesidad de realizar un importante esfuerzo para calibrar las técnicas experimentales. Para ello se fabricó especialmente un alambre perlítico de 20 mm de diámetro y se sometió al paso a través de una matriz de trefilado de geometría conocida y en condiciones controladas. Además, para evitar cualquier alteración en las tensiones residuales, los alambres se mantuvieron rectos en todo momento. Las tensiones residuales en la sección transversal del alambre trefilado se determinaron tanto en la fase ferrita como en la cementita. Para ello se realizaron medidas en el difractómetro de neutrones de REST (NFL-Studsvik, Suecia) y también se utilizó la radiación sincrotrón de alta energía, llevándose a cabo las medidas en la línea ID15A del Sincrotrón ESRF (Grenoble, Francia). Más detalles se pueden encontrar en las referencias [18,19,20]. Las macro tensiones en el material perlítico se determinaron a partir de la regla de la mezclas utilizando las tensiones medidas experimentalmente en cada fase, corregidas con el porcentaje relativo de cada una (90% ferrita y 10% cementita). Los perfiles de tensiones en cada fase y de macro tensiones se muestran en la Figura 7. Como se aprecia en la figura, aunque la fracción volumétrica de la cementita es pequeña, al representar la fase dura, sus tensiones son un orden de magnitud superior a las existentes en la ferrita. Ésta fue la primera vez, al menos hasta donde llega el conocimiento de los autores, en que se había obtenido un perfil de tensiones residuales completo a lo largo de un diámetro en un alambre de pretensado.

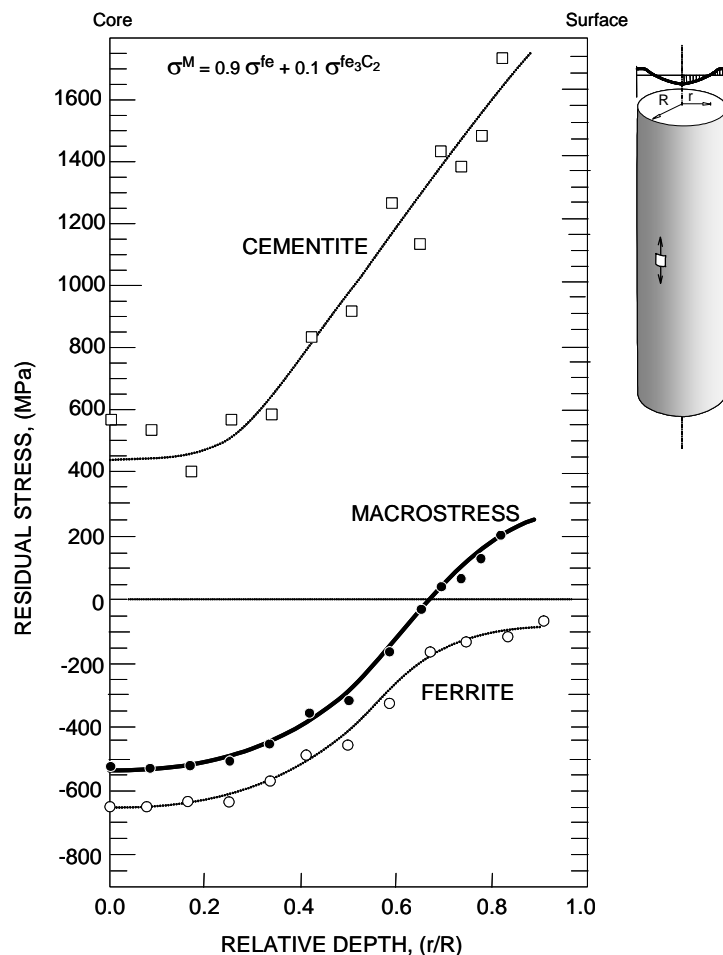


Fig. 7. Perfil de tensiones residuales medido a lo largo de un radio en las dos fases (ferrita y cementita) de un alambre de pretensado. Las tensiones globales (macro tensiones) en el material se han obtenido a partir de las tensiones medidas en cada fase utilizando la regla de las mezclas (% en volumen: 90% ferrita, 10% cementita) [19].

### 4.4 Control experimental de las tensiones residuales en alambres comerciales

Una vez calibrados los métodos experimentales y exploradas las posibilidades de las técnicas de difracción, el gran reto era la caracterización de las tensiones residuales en alambres de pretensado comerciales. A lo largo de este trabajo se



han realizado medidas experimentales y simulaciones numéricas sobre un número considerable de alambres de pretensado comerciales con diferentes perfiles de tensiones residuales, lo que ha permitido estudiar la influencia de las mismas en las propiedades mecánicas finales de los alambres [14,21,22].

Los resultados muestran que hoy en día disponemos de herramientas poderosas para afrontar este problema, tanto desde el punto de vista numérico como experimental, aunque para una interpretación correcta de los resultados siga siendo muy importante conocer sus dificultades y limitaciones. La difracción de neutrones y de rayos X de alta intensidad (sincrotrón) son técnicas muy potentes pero es complicado acceder a ellas (sólo hay un número pequeño de fuentes disponibles en el mundo) por lo que siguen perteneciendo más bien a ámbitos científicos. Sin embargo, los difractómetros de rayos X convencionales ya existen en muchos laboratorios y la medida de tensiones residuales por difracción de rayos X empieza a considerarse una labor rutinaria y regulada por norma para muchos materiales. Todo parece indicar que en un futuro próximo las normas internacionales (nuevo Model Code) exigirán a los fabricantes medir y controlar las tensiones residuales en la superficie de los alambres de pretensado.

Además, uno de los aspectos en que más ha evolucionado el equipamiento de los difractómetros en los últimos años ha sido en la disponibilidad de máquinas que permiten simular procesos de carga en las muestras mientras se miden las tensiones. En opinión de los autores, estas técnicas se pueden aprovechar para solventar algunas de las limitaciones de los métodos de difracción actuales, al permitir obtener relaciones entre las macrotensiones producidas al someter a la probeta a una carga conocida y lo que realmente se puede medir en las técnicas de difracción, que es el incremento de la distancia interplanar en la ferrita [21].

## 5. Conclusiones

En los apartados anteriores se han resumido los principales resultados del trabajo llevado a cabo en los últimos años por los autores sobre la medida y control de las tensiones residuales y su importancia en las propiedades de las armaduras activas del hormigón pretensado. Se ha mostrado que las tensiones residuales tienen una influencia fundamental en el comportamiento mecánico de las armaduras y que, aún con sus limitaciones, hoy en día existen técnicas experimentales y numéricas para caracterizarlas. Todo parece indicar que en los próximos años los códigos (p.ej. Model Code de la *fib*) empezarán a exigir medidas de las tensiones residuales en la superficie de los alambres, controlando que sean inferiores a un determinado valor.

En vista de los problemas de corrosión bajo tensión que presentan las armaduras activas, incluso los alambres de baja relajación, la cuestión que queda entonces pendiente es si somos o no capaces de mejorar su durabilidad en entornos agresivos. Los resultados de nuestro trabajo muestran que es posible mejorar la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión de las armaduras, induciendo tensiones residuales de compresión en la superficie. El problema es que generar tensiones residuales, en vez de eliminarlas, empeoraría el comportamiento en el ensayo de tracción y sobre todo en el ensayo de relajación. Dicho de otra forma: no se pueden optimizar todas las propiedades a la vez, porque la relajación y el ensayo de tracción dependen de lo que sucede en toda la sección del alambre, mientras que la corrosión depende fundamentalmente de las condiciones de su superficie. Es necesario elegir el tratamiento adecuado en función de los requisitos y condiciones de trabajo que vayan a experimentar los alambres. Esto también debería ser tenido en cuenta por los pliegos de condiciones, ya que determinadas exigencias pueden resultar incompatibles.

En opinión de los autores, en vista de los problemas de durabilidad existentes, podría ser interesante preparar calidades especiales de alambre que aseguraran un mejor comportamiento del material a corrosión bajo tensión cuando fueran a ser utilizados en estructuras pretensadas cerca de ambientes agresivos (agua marina). El control de las tensiones residuales es una herramienta clave para optimizar los tratamientos y las propiedades de estos materiales y en un futuro nos permitirá diseñar alambres especiales para aplicaciones específicas.

## Agradecimientos

Los autores desean mostrar su agradecimiento al apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyecto FEDER UPM 00.33.004) y al Ministerio de Fomento (proyecto "Durabilidad de armaduras activas en estructuras de hormigón pretensado"). Este trabajo también ha sido financiado gracias a la red SEDUREC integrada en el programa CONSOLIDER-INGENIO 2010. También desean mostrar su gratitud a D. Luis del Pozo, de EMESA Trefilería SA, por su ayuda y sus útiles comentarios y, en especial, a los profesores F. Mompeán, M. García Hernández y M. Martínez (ICMM) por su trabajo con las medidas de difracción y al profesor L. Caballero por su ayuda con los ensayos de corrosión bajo tensión.

## Referencias

- [1] GANZ, H.R. and BASTIEN, J., "fib Commision 9: 1996 to 2007", *Structural Concrete* 8(4), 2007, pp. 218-221.
- [2] TAERWE, L. (ed.). *Durability of post-tensioning tendons*. Proc. 1st. fib Workshop, Ghent, Belgium, 2001.
- [3] ELSENER B. (ed.). *Durability of post-tensioning tendons*. Proc. 2nd fib Workshop, Zurich, Switzerland, 2004.
- [4] ELICES, M., "Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlitic wires," *Journal of Materials Science*, 39(12), 2004, pp. 3889-3899.
- [5] ATIENZA, J.M., "Residual stresses in cold drawn steel wires", PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid (Spain) 2001, 230 pags.
- [6] ATIENZA, J.M., RUIZ-HERVIAS, J., CABALLERO, L. and ELICES, M., "Residual stresses and durability in cold drawn eutectoid steel wires", *Metals & Materials International*, 13:2, 2007, pp. 139-143.
- [7] ATIENZA J.M., J. RUIZ-HERVIAS, L. CABALLERO, AND M. ELICES, "Residual stresses and stress corrosion in cold drawn eutectoid steel wires," *Wire Journal International*, pag. 53-57, june 2007.
- [8] NOYAN I.C. AND J.B. COHEN, *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1987.
- [9] WITHERS P.J. AND H.K.D.H. BHADESHIA, "Residual stress. Part 1-Measurement techniques", *Materials Science and Technology*, 176, pp 355-365, 2001.
- [10] ATIENZA, J. M., AND ELICES, M. "Influence of residual stresses in the tensile test of cold drawn wires." *Materials and Structures*, 36, 548-552, 2003.
- [11] ATIENZA, J.M., AND ELICES, M. "Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires." *Materials and Structures*, 37, 301-304, 2004.
- [12] ATIENZA, J.M. AND ELICES M. "Role of residual stresses in the stress relaxation of prestressed concrete wires". *Journal of Materials in Civil Engineering* 19:8, pp 703-707, 2007.
- [13] ELICES, M., RUIZ, J., AND ATIENZA, J.M. "Influence of residual stresses on hydrogen embrittlement of cold drawn wires". *Materials and Structures*, 37, 305-309, 2004.
- [14] RUIZ-HERVIAS, J., LUZIN, V., PRASK, H., GNAEUPEL-HEROLD, T., ELICES, M. "Effect of thermo-mechanical treatments on residual stresses measured by neutron diffraction in cold-drawn steel rods." *Material Science and Engineering A*, vol. 435-436, pp. 725-735, 2006.
- [15] VAN ACKER K., J. ROOT, P. VAN HOUTTE AND E. AERNOUDT, "Neutron diffraction measurement of the residual stress in the cementite and ferrite phases of cold drawn steel wires", *Acta Materialia*, 44, pp 4039-4049, 1996.
- [16] WILLEMSE P.F., B.P. NAUGHTON AND C.A. VERBRAAK, "X-ray residual stress measurement on cold drawn steel wire", *Material Science and Engineering A*, 56, pp 25-37, 1982.
- [17] WINTHOLZ R. AND J.B. COHEN, "Load sharing of the phases in 1080 steel during low-cycle fatigue", *Metallurgical Transactions* 23A, pp 341-354, 1992.
- [18] ATIENZA J.M., M.L. MARTINEZ-PEREZ, J. RUIZ-HERVIAS, F.J. MOMPEAN, M. GARCIA-HERNANDEZ AND M. ELICES, "Residual stresses in cold drawn ferritic rods", *Scripta Materialia*, 52, pp 305-309, 2005.
- [19] MARTINEZ-PEREZ M.L., F.J. MOMPEAN, J. RUIZ-HERVIAS, C.R. BORLADO, J.M. ATIENZA, M. GARCÍA-HERNANDEZ, M. ELICES, J. GIL SEVILLANO, RU LIN PENG AND T. BUSLAPS, "Residual stress profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction", *Acta Materialia*, 52, pp 5303-5313, 2004.
- [20] ATIENZA J.M., J. RUIZ-HERVÍAS, M.L. MARTÍNEZ-PEREZ, F.J. MOMPEÁN, M. GARCÍA-HERNANDEZ AND M. ELICES, "Residual stresses in cold drawn pearlitic rods", *Scripta Materialia*, 52, pp 1223-1228, 2005.
- [21] ATIENZA J.M., J. RUIZ-HERVIAS, M. ELICES, E.C. OLIVER. "Residual and service macrostresses in cold drawn eutectoid steel wires". *Material Science & Engineering*, enviado.
- [22] RUIZ-HERVÍAS J., J.M. ATIENZA, M. ELICES AND E.C. OLIVER, "Optimisation of post-drawing treatments by means of neutron diffraction", *Materials Science and Engineering A*, 480 (1-2), 439-448, 2008.